袋式除尘器破袋检测技术研究现状

陈思墨[1]，谢冬明[1]，张 华[1]，罗 波[1]，周浩宇[1]，李旭东[1]，廖婷婷[1]，任财轩[2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司 a. 工程技术研究中心；b. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205；2. 云南曲靖呈钢钢铁（集团）有限公司，云南 曲靖 655000）

摘要：袋式除尘器凭借除尘效率高、处理风量大的优势，广泛应用于钢铁、水泥等高排放行业。然而，滤袋破损导致的粉尘排放超标，已成为触发环保停机并造成经济损失的主要风险点。现有研究与实践表明，清灰参数设置不当及运行工况异常是导致破袋的重要诱因。为此，本文首先分析了清灰方式与滤袋破损的内在机理，继而重点综述了破袋检测与定位技术的演进：从传统的人工检查、压差监测、粉尘浓度监测，发展到时间反溯联用技术及基于图像、分布式光纤的智能识别技术。通过对比各类技术的适用场景与局限性，旨在为工业现场实现破袋风险的早期预警与精准定位提供理论依据，并为企业的运维决策与技术选型提供参考。

关键词：烟气除尘；袋式除尘器；滤袋破损；图片识别；机器视觉
中图分类号：X701.2；TP181 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764（2026）03－0014－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.042

Research status on filter bags breakage detection technology in bag filler

CHEN Simo[1], XIE Dongming[1], ZHANG Hua[1], LUO Bo[1], ZHOU Haoyu[1], LI Xudong[1], LIAO Tingting[1], REN Caixuan[2]
（1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd. a. Engineering Technology Research Center; b. National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha 410205, Hunan, China; 2. Yunnan Qujing Chenggang Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Qujing 655000, Yunnan, China）

Abstract: Bag fillers are widely used in high-emission industries such as steel and cement by virtue of their high dust removal efficiency and large air volume. However, excessive dust emissions caused by filter bags breakage have become a major risk point that triggers environmental downtime and causes economic losses. Existing research and practice show that improper setting of ash cleaning parameters and abnormal operating conditions are important triggers for bag breakage. To this end, first, the internal mechanisms of dust cleaning methods and filter bags breakage are analyzed. Then, the evolution of bag breakage detection and localization technologies is systematically reviewed: from traditional manual inspections, differential pressure monitoring, and dust concentration monitoring, to the development of time-reversal combined technologies, as well as intelligent recognition technologies of image-based and distributed optical fiber. By comparing the applicable scenarios and limitations of various technologies, it aims to provide a theoretical basis for early warning and accurate positioning of bag breakage risks in industrial sites, and provide a reference for enterprises' operation and maintenance decisions and technology selection.

Key words: flue gas dust removal; bag filler; filter bags breakage; image recognition; machine vision

袋式除尘器凭借除尘效率高、处理风量大及运行可靠等优势，在钢铁、水泥、有色等重工业领域得到了广泛应用[1]。然而，工业运行中不可避免出现的滤袋破损问题，会导致出口烟气粉尘

收稿日期：2025－11－28；**修回日期**：2026－03－13
基金项目：湖南省科技成果转化及产业化计划（2020SKC4003）
作者简介：陈思墨（1994—），男，工程师，从事机器视觉、暖通除尘等方面的研究。

浓度超标；严重时将触发环保强制停机，造成巨大的经济损失[2]。尽管脉冲喷吹清灰技术已逐渐成为主流，但传统的破袋检测仍高度依赖人工，存在效率低、劳动强度大及必须停机等局限。因此，如何在复杂工况下及时、快速、精准地实现破袋在线检测与定位，已成为业内亟待解决的关键问题。

鉴于此，本文在梳理滤袋破损成因的基础上，重点对比分析了从传统人工检测到现代智能检测技术的演进路径及各方法的优劣势，旨在为行业技术人员进行技术选型提供参考。

1　袋式除尘器清灰方式

袋式除尘器清灰方式直接决定了其过滤效率、设备阻力、滤袋寿命及运行能耗。依据清灰方式的不同，可将其分为机械振动式、反吹风式和脉冲喷吹式[3-6]。

机械振动清灰袋式除尘器是利用机械装置(如电动振打器、凸轮机构或气动提升阀)周期性地振动或摇动悬挂滤袋的框架，使滤袋产生垂直于其表面的抖动、摆动或扭曲，从而破坏粉尘层与滤袋间的黏附力，使粉尘层断裂并落入灰斗。其结构示意如图 1 所示[3]。机械振动清灰袋式除尘器主要有顶部振动、中部振动、机械振打与反吹风结合三种振动方式，且结构简单，初期投资成本最低，运行可靠，操作维护简便。但也存在清灰强度弱，对黏性、细微粉尘清灰效果差的问题。并且机械振动对滤袋损伤大，会显著缩短滤袋寿命。振动还容易引起除尘器本体钢结构疲劳。因此，其主要用于处理气量小、粉尘浓度低、黏性不强的常规工况。在现代工业中已逐渐被高效清灰方式取代[3-6]。

负压反吹风清灰袋式除尘器是通过阀门切换，引入与过滤气流方向相反的低压气流，使滤袋在反吹风作用下被压瘪或缩瘪，通过滤袋的变形使粉尘层剥落，如图 2 所示[3]。分室反吹风是其最典型的形式，清灰时关闭该室净气出口，切断过滤气流，然后开启反吹风阀进行离线清灰。其清灰动作温和，对滤袋机械损伤极小，特别适用于玻璃纤维等脆性滤料。此外，清灰气流分布均匀，

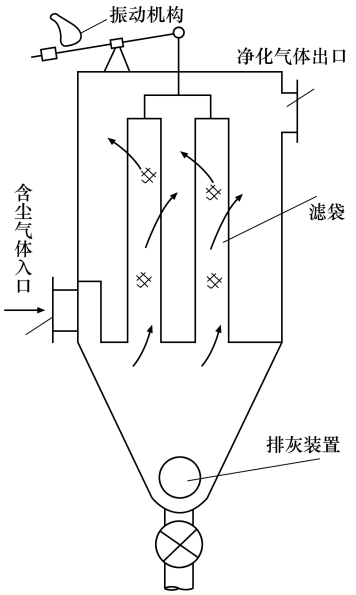


图 1　机械振动清灰袋式除尘器结构示意[3]

Fig. 1　Schematic diagram of the structure of a mechanical vibration cleaning bag filter

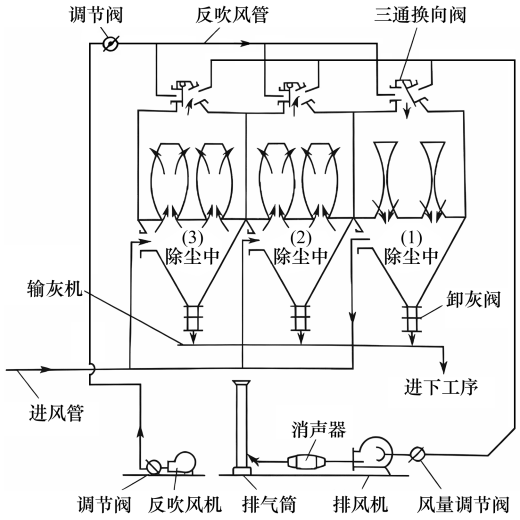


图 2　负压反吹风清灰袋式除尘器结构示意[3]

Fig. 2　Schematic diagram of the structure of a negative pressure reverse air bag filter

滤袋寿命较长。但其清灰强度相对较弱、过滤风速较低，导致设备体积庞大；结构复杂，需大量阀门及控制系统；离线清灰模式，总过滤面积周期性减少。因此，其适用于处理大风量、低浓度、温度高、粉尘颗粒较粗的工况[3-6]。

脉冲喷吹清灰袋式除尘器通过控制脉冲阀瞬间开启，储存在气包中的压缩空气以极高速度从喷吹管喷嘴喷出，并可诱导二次空气进入滤袋。这股高速气流使滤袋自袋口向底部急剧膨胀和振

动，形成强大的冲击波，从而高效清除滤袋表面的粉尘层，如图 3 所示[3]。此方式清灰时间短，清灰强度大，效果好，能有效清除稍带黏性、细微粉尘，可实现在线清灰，保证工艺连续性；允许采用高过滤风速，设备结构紧凑；处理风量范围极广，从单机到超大型除尘器均可适用[3-6]。

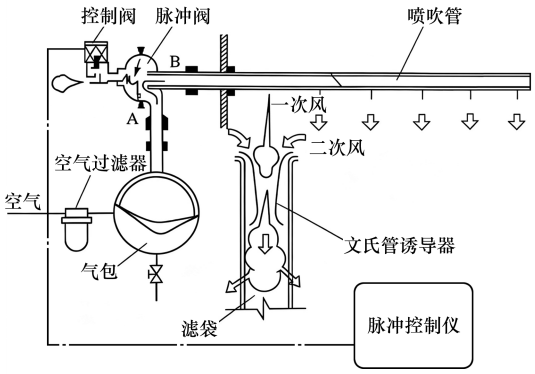


图 3 脉冲喷吹清灰袋式除尘器结构示意[3]

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of a pulse-jet cleaned bag filter

旋转脉冲袋式除尘器的组成与回转反吹风袋式除尘器类似，区别在于把反吹风机和反吹清灰装置改为压缩空气或高压空气及脉冲清灰装置，如图 4 所示[3]。其采用分室停风清灰技术，并采用较大直径脉冲阀，喷吹气量大，清灰能力强，除尘效率高，排放浓度及漏风率低，运行稳定，且脉冲阀少，易于维护[7]。

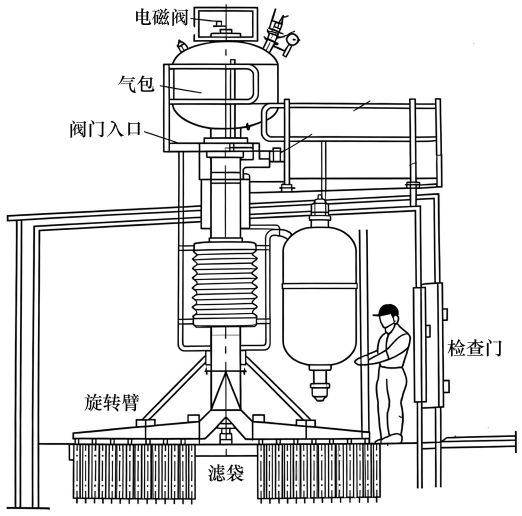


图 4 旋转脉冲袋式除尘器结构示意[3]

Fig. 4 Schematic diagram of the structure of a rotary pulse jet bag filter

2 滤袋破损成因

袋式除尘器的滤袋是其核心部件，滤袋破损是导致除尘器失效的最常见原因。滤袋破损的成因非常复杂，通常是多种因素共同作用的结果，主要有以下几个方面。

（1）机械磨损。机械磨损是滤袋破损最直接、最常见的形式(图 5)。其主要包括：① 袋笼(骨架)摩擦。袋笼表面有毛刺、焊疤、锈蚀或凹凸不平，在频繁的喷吹振动下，会持续磨损滤袋，导致破洞。袋笼垂直度不够，导致滤袋在喷吹时与相邻袋笼或箱体壁发生碰撞和摩擦。袋笼经过长时间使用后发生弯曲变形，也会加剧磨损。滤袋与滤袋之间、滤袋与箱体壁之间的间隙过小，导致运行时相互碰撞摩擦。② 安装不当。安装滤袋时用力过猛，与金属件发生钩挂、拉扯，造成初始损伤。滤袋与花板孔配合不当，要么过紧难以安装，要么过松导致漏灰或喷吹时抖动磨损。③ 气流冲刷。进口流速过高：含尘气流进入除尘器箱体时，速度过快，直接冲刷滤袋底部或侧面，造成局部严重磨损。气流分布不均：导流板设计不当或脱落，导致箱体内气流形成涡流或高速区，对部分滤袋造成集中冲刷[8-12]。



图 5 机械磨损破损滤袋

Fig. 5 Filter bag damaged by mechanical wear

（2）化学腐蚀。在处理含有酸碱性成分或水汽的烟气时，化学腐蚀是主要问题。其主要有：① 酸露点腐蚀。当烟气温度低于其酸露点(特别是硫酸露点)时，烟气中的 SO_2、SO_3 等酸性气体会在滤袋表面凝结成酸液，腐蚀滤袋纤维、袋笼和箱体。这是导致滤袋强度丧失、变得酥脆易破的主要原因之一。② 碱性腐蚀。水泥、化肥等行业的粉尘可能含有氨等碱性物质，这类物质在特

定条件下也会腐蚀滤料。③ 氧化反应。某些滤料材质(如 PPS)在高温和高氧含量条件下，容易被氧化，导致纤维强度下降、变脆、寿命缩短[8-12]。

(3) 高温损伤。滤料材质都有其耐受的温度上限，超过则会使滤袋受到高温损伤导致破损。其主要有：① 长期超温运行。如果烟气温度持续高于滤料的最高连续使用温度，会使滤袋硬化、收缩、变脆，加速老化破损。② 瞬时高温(烧毁)。工况出现异常，如明火、未燃尽的火星进入除尘器，会直接烧穿滤袋，形成破洞[8-12]。

(4) 喷吹清灰系统问题。脉冲喷吹本身是清灰手段，但设计或操作不当也会成为破坏源。其主要有：① 喷吹压力过高。过高的压力会使滤袋在清灰时加速度过大，与袋笼剧烈碰撞，同时使纤维疲劳、松散，导致机械性损伤。② 喷吹频率不当。过于频繁的喷吹会加剧滤袋的机械疲劳。喷吹不足则导致滤袋上的残余粉尘过多，设备阻力增大，也可能造成糊袋和难以清除的板结。③ 喷吹管故障。喷吹管松动、移位或喷嘴歪斜，导致气流中心偏离滤袋中心，直接冲刷滤袋一侧，造成局部破损。电磁脉冲阀损坏，导致某些滤袋不被清灰或持续喷吹[8-12]。

(5) 结露与糊袋。除尘器开机时，箱体温度低于烟气露点，或停机后，箱体内残留湿热空气冷却时，当外部空气进入低温的除尘器(冷漏风)，结露会使粉尘潮解，黏附在滤袋表面，形成泥浆状的糊袋，造成清灰困难，阻力增大。在强力喷吹下，板结的粉尘块可能与滤袋纤维一同被吹落，造成滤袋损伤，且潮湿环境会加剧化学腐蚀[8-12]。

(6) 滤料选择不当。滤料材质的选择错误将直接导致滤袋的早期失效。若不考虑烟气温度、成分(酸碱性、氧化性)、粉尘特性(磨琢性、黏性)，选择错误的滤料材质。如对于易水解的滤料(如 PPS)，未进行抗水解处理；对于要求高的工况，未进行烧毛、压光、PTFE 浸渍等表面处理，将影响其固有的性能[8-12]。

3　滤袋破损检测定位方法

目前滤袋破损检测主要分人工检测和自动检测。在滤袋破损人工检测方面，一般有人工目测排查法、花板积灰经验排查法、荧光粉检漏排查法等，这些都需要在除尘器停机时，人工目测找寻破损滤袋位置，工作量大，工作环境恶劣，耗时较长[13-14]。在滤袋破损自动检测方面，有电荷法、电容法、压差法、光纤法、颗粒物浓度 - 清灰动作耦合法、光学法、机器视觉检测定位法等[15]。电荷法只能进行定性分析，并且只能检测单个净气室的滤袋破损[16]。电容法仍停留在实验室阶段[17]。压差法和光纤法传感器数量多，成本高，安装工作量大[18]。光学法由于光学发射和接收装置易被粉尘污染遮蔽，容易误报，检修量大[20]。机器视觉检测定位法是通过摄像头拍摄袋口泄漏粉尘画面，通过算法分析是否破袋工况，并定位破袋口位置，具有维护简单，自动化程度高的优势。以下详细介绍几种滤袋破损检测定位方法。

3.1　人工检查法

滤袋破损检测主要靠人工定期巡检，通过观察烟囱排放状况、定时记录系统压差变化等间接判断是否破袋。还可在净气室离线时，人工观察花板位置滤袋口状态，通过积灰异常情况判断滤袋是否发生破损。但人工检查方法不仅工作量巨大、效率低下，而且检查结果严重依赖于工人的经验，对于微细破损难以发现，同时也存在有限空间作业的安全隐患[13-15]。

另外还有荧光粉检漏法，即在除尘器停机状态下，向除尘器内部均匀喷洒荧光粉，然后开启风机，使含尘气体模拟正常运行工况流经滤袋。然后在黑暗环境下，用紫外线灯照射滤袋，若滤袋上有荧光粉泄漏的亮点，则为破损滤袋[13-15]。该方法能有效查找细微裂缝、针孔等破损。虽然荧光粉法相对灵敏，可定位微小破损，但仍需停机操作，存在荧光粉污染问题，劳动强度大，且不适用于在线监测。

3.2　压差监测法

压差监测法通过实时监测除尘器进出口压差变化来判断滤袋状态。在正常工况下，袋式除尘器的进出口压差维持在相对稳定的范围内。当滤袋发生破损时，过滤阻力减小，压差会出现明显下降；而当滤袋发生堵塞时，压差则会升高[21]。

压差监测法虽然简单易行，能够实现连续监测，但其灵敏度较低，无法准确定位破损滤袋的准确位置，且在多仓室除尘器中，单个破损滤袋引起的压差变化可能被整体压差变化所掩盖。清灰周期和粉尘特性变化也会影响压差读数，误报率较高。

3.3 粉尘浓度监测法

粉尘浓度监测法是在除尘器出口安装粉尘浓度检测仪，当滤袋破损时，出口粉尘浓度会显著升高。由于该方法可直接反映排放状况，所以环保达标在线监测一般都采用该方法[24-26]。

粉尘浓度监测设备通常采用β射线吸收法原理，量程为0.1～1 000 mg/m^3，用于进出口质量浓度同步监测，也可以采用激光散射法，通过对比进出口颗粒物浓度来计算除尘效率[24-26]。该方法无法确定具体哪个滤袋发生破损。此外，粉尘浓度监测设备价格昂贵，且需要定期维护，在粉尘浓度较低时灵敏度不足，只有当多个滤袋或单个滤袋出现较大破损时才能有效检测。

3.4 时间反溯定位与粉尘浓度监测联用

时间反溯定位与粉尘浓度监测联用是当某一脉冲阀动作时粉尘经过一段时间t后达到出口后会引起出口粉尘浓度变化，将粉尘浓度变化时刻再加上时间t即可反向溯源到脉冲阀动作时刻，从而判断出哪个脉冲阀对应范围内的滤袋存在滤袋破损。由于一个脉冲阀一般对应一排滤袋，所以该方法能定位到单排滤袋，定位精度较高。并且该方法只需增加一个计算模块即可实现破袋检测定位，简单易行，成本低，是当前主推的一类方法[21]。

但该方法中，从不同气室的不同脉冲阀对应的单排滤袋泄露的粉尘到达粉尘浓度仪的时长是不一样的，一方面是各个气室泄露粉尘到达粉尘浓度检测仪的这段时间的时长差异，如距离出口最远气室的粉尘比距离出口最近气室的粉尘需要更长时间到达出口粉尘浓度检测仪；另一方面是同一个气室内不同脉冲阀对应的单排滤袋泄露粉尘达到粉尘浓度检测仪的这段时间的时长差异，后者的差异小于前者。由于脉冲阀间隔时间在秒级，所以气室间的时长差异为主要影响。并且当预估设置好各脉冲阀对应反溯时长后，由于除尘器长期运行后的气流组织变化，实际时长和预设时长之间误差增大，极易造成误报。与此同时该方法仍存在粉尘浓度检测仪的缺点。

3.5 基于图像的识别定位技术

随着机器视觉技术的发展，基于图像的滤袋破损识别定位技术逐渐成熟。该技术通过采集袋口图像信息，利用图像处理算法和深度学习模型自动识别破损位置。基于图像的检测系统通常包括光源、相机、图像采集卡和处理器等组成部分。相机配备气流清灰和自动刷头清灰等清灰方式，防止粉尘污染镜头。相机多采用POE供电，光源采用12 V或24 V低压光源，满足有限空间下使用电压等级要求。

首先获取袋式除尘器的袋口图像信息，对图像进行预处理生成目标图像信息，然后将目标图像输入预设破袋定位深度学习模型进行识别，直接得到破袋洞口的行列编号，系统基于定位信息进行存储并发送警报。

刘凯丽[25]通过背景差分、基于颜色特征和基于图像局部信息熵三种不同检测方法在模拟实验台上进行了烟尘泄露模拟实验，均能检测出泄露袋口所在行列位置。但其模拟实验时摄像头处于袋口垂直上方中心，能拍摄到没有遮蔽的所有袋口清晰图像，而这与实际袋式除尘器情况不同。

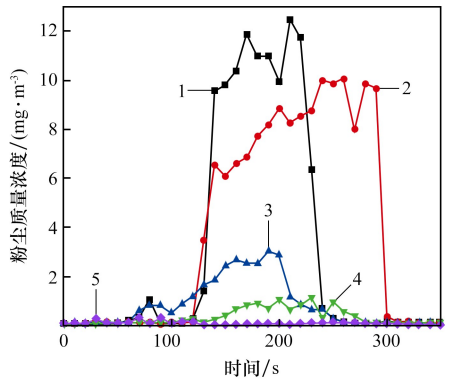
国内某机械厂开发的袋式除尘器智能检测系统采用可见光补光，黑白成像，当检测算法检测到当前画面存在烟尘泄露时，则进行报警。该系统能检测定位到单个气室的滤袋破损，但易受脉冲阀喷吹振动等工况的干扰，产生误报。其系统界面如图6所示[26]。

本文作者团队开发的单袋口级别袋式除尘器破袋检测定位系统通过相干光散射强化显影技术使得从滤袋口泄露的破袋工况低浓度粉尘能被摄像头捕捉到，再通过智能算法得到破袋口行列定位信息，突破了单袋口破袋检测定位技术瓶颈[2]，能实时分析得到破袋口粉尘浓度和破袋口尺寸数据，多个破袋口尺寸的粉尘浓度曲线[27]，如图7所示。该破袋检测定位系统除了在除尘器上固定安装的版本外，还开发了便携式版本，能即插即用，提供破袋检测服务。



图 6　袋式除尘器智能检测系统界面

Fig. 6 Interface diagram of intelligent detection system



1—全漏；2—5 cm^2；3—2 cm^2；4—1 cm^2；5—正常。

图 7　多个破袋口尺寸的粉尘浓度曲线[27]

Fig. 7　Dust concentration curves for different broken bag opening sizes

3.6　分布式光纤测振识别定位

基于相位敏感光时域反射计∅-OTDR 分布式光纤传感系统通过检测脉冲光扫描铺设在被检测载体上的传感光纤后产生的后向瑞利散射相干光强来识别并定位外界入侵振动信号。在袋式除尘器的每个滤袋内都悬挂对折的光纤，如图 8 所示。当袋式除尘器工作时，光纤产生振动，∅-OTDR 分布式光纤传感系统检测到光纤振动信号。当某个滤袋破损时，粉尘进入滤袋内部，引起滤袋内流场变化，进而使光纤振动信号发生改变；通过算法分析该位置的振动信号，即可判断是否存在破袋[18,28-29]。



图 8　滤袋布设光纤实物[18]

Fig. 8　Photograph of optical fiber deployment on a filter bag

∅-OTDR 分布式光纤传感系统实时在线监测每个滤袋的振动信号，识别率高、定位精度高。但是该系统需要在每个滤袋内悬挂光纤，布线工作量大，且难以在高温袋式除尘器使用。并且其主要依靠振动信号判断是否存在破袋，当除破袋工况外的其他工况导致滤袋振动时，则容易引起误报。

4 结论与展望

本文分析了多种袋式除尘器破袋检测技术的原理与应用现状。研究表明：人工巡检与荧光粉检漏依赖人工经验且为离线检测，难以满足现代化生产需求；压差与粉尘浓度监测虽实现了在线化，但定位精度不足。相比之下，基于图像识别的单袋口定位技术和结合时间反溯算法的粉尘监测技术，显著提升了检测的时空分辨率，代表了当前技术的前沿方向。此外，便携式检测系统的应用有效降低了运维成本。尽管分布式光纤测振技术在理论上可行，但受限于滤袋布置复杂及成本因素，目前应用较少。

展望未来，袋式除尘器破袋检测将加速向智能化、数字化转型。依托与本体独立的检测系统架构优势，通过引入多元数据融合技术与人工智能算法，构建“感知—诊断—预测”一体化的智能运维平台，将是解决滤袋破损早期预警难、定位精度低等痛点的根本途径，也是推动工业烟尘治理领域新质生产力发展的关键一环。

参考文献：

[1] 柳静献,毛宁,孙熙,等. 我国袋式除尘技术历史、现状与发展趋势综述[J]. 中国环保产业,2022(1):47－58.
LIU Jingxian,MAO Ning,SUN Xi,et al. A review of the history, current status, and development trends of bag filter technology in China[J]. China Environmental Protection Industry,2022(1):47－58.

[2] 李旭东,廖婷婷,乐文毅,等. 基于YOLOv3的袋式除尘器滤袋破损自动检测方法[J]. 烧结球团,2024,49(1):99－105.
LI Xudong,LIAO Tingting,YUE Wenyi,et al. Automatic detection method on filter bag damage of bag filter based on YOLOv3[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(1):99－105.

[3] 张殿印,刘璀. 除尘设备手册[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2019:827.
ZHANG Dianyin, LIU Jin. Manual of dust removal equipment[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press,2019:827.

[4] 郝文阁,石伟,丁姝,等. 回转反吹袋式除尘器清灰机理与清灰系统设计方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2009,30(10):1497－1500.
HAO Wenge,SHI Wei,DING Shu,et al. Mechanism and design method of a dust cleaning system:Rotary blowback bag filter[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2009,30(10):1497－1500.

[5] 万凯迪,王智化,胡利华,等. 袋式除尘器脉冲喷吹清灰过程的数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2014,34(23):3970－3976.
WAN Kaidi,WANG Zhihua,HU Lihua,et al. Numerical simulation of pulse-jet cleaning process of bag filter[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(23):3970－3976.

[6] 田玮. 脉冲喷吹袋式除尘器清灰的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
TIAN Wei. Studies on dust dislodgement in pulse-jet fabric filters[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2005.

[7] 王冰,刘琦. 机械回转反吹袋式除尘器清灰能力的研究[J]. 安全与环境学报,2005(2):65－68.
WANG Bing,LIU Qi. Study on ability of cleaning dust to machinery rotation anti blow bag filter[J]. Journal of Safety and Environment,2005(2):65－68.

[8] 王赫,党小庆,曹利,等. 基于CFD的滤袋内侧磨损失效过程分析[J]. 环境工程学报,2022,16(2):535－545.
WANG He,DANG Xiaoqing,CAO Li,et al. Analysis on the wear-out failure process of the inner surface of the filter bag based on CFD[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2022,16(2):535－545.

[9] 王加东,范兰. 脉冲布袋除尘器的常见故障及其原因分析[J]. 环境工程,2013,31(S1):422－423.
WANG Jiadong,FAN Lan. Common fault and its reason analysis of pulse bag filter[J]. Environmental Engineering,2013,31(S1):422－423.

[10] 王丹丹,钱付平,夏勇军,等. 基于故障树分析法袋式除尘器滤袋失效的研究与应用[J]. 环境工程学报,2016,10(6):3118－3124.
WANG Dandan,QIAN Fuping,XIA Yongjun,et al. Study and application of bags' failure in bag filter using fault tree analysis method[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(6):3118－3124.

[11] 杨宏伟. 基于多传感器数据融合的袋式除尘器滤袋破损监测方法研究[D]. 天津:河北工业大学,2018.
YANG Hongwei. Research on filter bag breakage

monitoring based on multi-sensor data fusion[D]. Tianjin:Hebei University of Technology,2018.

[12] 杜振,钱徐悦,魏宏鸽,等. 袋式除尘器运行情况分析及延长滤袋寿命的运行措施[J]. 热力发电,2013,42(3):74 – 76.
DU Zhen,QIAN Xuyue,WEI Hongge,et al. Analysis and optimization for operation of bag filter[J]. Thermal Power Generation,2013,42(3):74 – 76.

[13] 张瑾. 荧光粉检漏技术在布袋除尘器上的应用[J]. 电力学报,2013,28(3):259 – 262.
ZHANG Jin. Application of fluorescent powder leak detection technology in bag filter[J]. Journal of Electric Power,2013,28(3):259 – 262.

[14] 余新明,吴学军,吕先昌. 布袋收尘穿漏监测及定位技术现状与展望[J]. 工业安全与环保,2005,31(5):13 – 14.
YU Xinming, WU Xuejun, LU Xianchang. The present situation and prospects of monitoring and locating leakage in bag filters[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2005,31(5):13 – 14.

[15] 周冬,王加稳,王海涛,等. 袋式除尘器智能化管理研究现状[J]. 环境工程,2023,41(S2):1110 – 1113.
ZHOU Dong, WANG Jiawen, WANG Haitao, et al. Research status of intelligent management of bag filter[J]. Environmental Engineering,2023,41(S2):1110 – 1113.

[16] 谢志英. 静电荷法布袋除尘检漏仪的研制[J]. 微计算机信息,2005,21(34):153 – 154.
XIE Zhiying. Electrostatic charge law fibaric bag dust exclusion leak hunting instrument development[J]. Control & Automation,2005,21(34):153 – 154.

[17] 贺艳停. 电容传感式布袋除尘器检漏技术研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2012.
HE Yanting. Technology of bag-house with leak detection by capacitive sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2012.

[18] 刘旭安,李俊,史博,等. 基于相位敏感型光时域反射仪的袋式除尘器漏袋检测技术[J]. 光子学报,2019,48(8):69 – 81.
LIU Xuan,LI Jun,SHI Bo,et al. Leakage bag detection technology of bag filter based on phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. Acta Photonica Sinica,2019,48(8):69 – 81.

[19] 刘艳. 脉喷袋除尘器智能破袋监测可行性分析[J]. 中国水泥,2015(11):99 – 100.
LIU Yan. Feasibility analysis of intelligent bag breaking monitoring for pulse jet bag dust collector[J]. China Cement,2015(11):99 – 100.

[20] 陈明,朱长纯,刘君华,等. 用多光路在线监测烟气中烟尘排放量的研究[J]. 中国环境科学,2001(3):68 – 70.
CHEN Ming,ZHU Changchun,LIU Junhua,et al. Studies on the in situ monitoring the output of smoke in fluegas by multi-light ways[J]. Cnina Environmental Science,2001(3):68 – 70.

[21] 刘家荣,韦大松. 基于西门子 PLC 除尘器粉尘防爆危险源信号检测及预警系统的研究[J]. 现代食品,2020,2(4):9 – 12.
LIU Jiarong, WEI Dasong. Research on dust explosion-proof hazard signal detection and early warning system based on siemens PLC[J]. Modern Food,2020,2(4):9 – 12.

[22] 刘霖,赵艳红,石零. 常温布袋除尘器检漏报警系统的研究[J]. 工业安全与环保,2011,37(7):18 – 19.
LIU Lin,ZHAO Yanhong,SHI Ling. The research on the leakage detecting and alarming system of bag filter at normal temperature[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2011,37(7):18 – 19.

[23] 贺艳停,向晓东,胡秋玮. 电容传感式布袋除尘器检漏技术研究[J]. 工业安全与环保,2013,39(1):44 – 46.
HE Yanting, XIANG Xiaodong, HU Qiuwei. Technology of bag-house filter leakage detection by capacitive sensor[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2013,39(1):44 – 46.

[24] 高华东,肖春. 烧结机尾布袋除尘器分室检漏及流场改造[J]. 中国环保产业,2018(7):47 – 50.
GAO Huadong, XIAO Chun. Branch chamber leak hunting and flow-field alteration of bag hose precipitator in sintering machine trail[J]. China Environmental Protection Industry,2018(7):47 – 50.

[25] 刘凯丽. 基于数字图像处理布袋除尘器检漏技术的研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2018.
LIU Kaili. Research on leak detection technology of bag filter based on digital image processing[D]. Maanshan: Anhui Universit of Technology,2018.

（下转第 40 页）

Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(5):407 – 413.

[15] 宋晓皎,王帅,王琦. 布风板阻力对流动传质的影响[J]. 节能,2020,39(5):67 – 70.
SONG Xiaojiao, WANG Shuai, WANG Qi. Influence of resistance of air distribution plate on flow and mass transfer[J]. Energy Conservation,2020,39(5):67 – 70.

[16] 张开兴,马国良,胡芳源,等. 绿茶风选装备设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2023,54(S2):366 – 374.
ZHANG Kaixing, MA Guoliang, HU Fangyuan, et al. Design of equipment and experiment on air separation performance of green tea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(S2):366 – 374.

[17] 张孟辉,邵彬,谢华华,等. 基于气 – 固两相流体动力学数值模拟的风选室设计[J]. 矿山机械,2019,47(8):47 – 51.
ZHANG Menghui,SHAO Bin,XIE Huahua,et al. Design of air separation chamber based on numerical simulation of gas-solid two-phase hydrodynamics[J]. Mining & Processing Equipment,2019,47(8):47 – 51.

(上接第13页)

[83] 谢奎,赵良,朱辰,等. pH摆动:钢渣矿化固碳工艺经济潜力评估[J]. 高校地质学报,2024,30(4):476 – 484.
XIE Kui, ZHAO Liang, ZHU Chen, et al. pH swing: evaluation of economic potential of mineralized carbon fixation process of steel slag[J]. Geological Journal of China Universities,2024,30(4):476 – 484.

[84] WATJANATEPIN P,STEINWIDDER L,DE SCHUTTER A, et al. Preliminary environmental and economic assessment of mineral carbonation of steel slags as a carbon capture, utilization and storage technology[J]. Procedia CIRP,2024,122:318 – 323.

(上接第21页)

[26] 秦皇岛首钢机械有限公司. 智能检测系统[EB/OL]. (2018 – 11 – 28)[2025 – 11 – 20]. https://mp.weixin.qq.com/s/j4eYj0RvQ09FMqqHs-AZhw.
Qinhuangdao Shougang Machinery Co., Ltd. Intelligent Detection System[EB/OL]. (2018 – 11 – 28)[2025 – 11 – 20]. https://mp.weixin.qq.com/s/j4eYj0RvQ09FMqqHs-AZhw.

[27] 陈思墨,乐文毅,李旭东,等. 基于机器视觉识别的袋式除尘器破袋检测定位技术研究与应用[C]//2024全国除尘技术研讨会论文集(下). 抚顺:中国环境保护产业协会除尘专业委员会,2024:662 – 666.
CHEN Simo,YUE Wenyi,LI Xudong,et al. Research and application of bag break detection and localization technology in baghouse dust collectors based on machine vision recognition[C]//Proceedings of the 2024 National Conference on Dust Control Technology (Volume II). Fushun: Dust Removal Professional Committee of China Environmental Protection Industry Association, 2024: 662 – 666.

[28] LIU Xuan, TANG Yuquan, ZHANG Zhirong, et al. A pattern recognition method for filter bags in bag dust collectors based on ∅-optical time-domain reflectometry [J]. Photonics,2024,11:152.

[29] 刘旭安,胡新广. 分布式光纤传感技术在除尘器破袋检测中的应用方案解析[J]. 科技视界,2023,13(18):37 – 40.
LIU Xuan,HU Xinguang. Analysis of application scheme of distributed optical fiber sensing technology in bag breakage detection of dust collector[J]. Science&Technology Vision,2023,13(18):37 – 40.